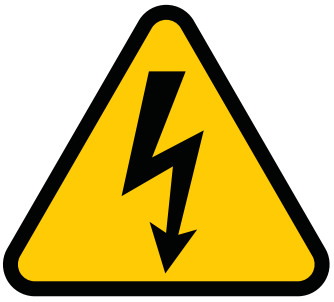


# Алюминиевые электролитические конденсаторы Vishay для источников питания

**Андрей Самоделов**

**Целью данной статьи является описание особенностей работы алюминиевых конденсаторов в источниках питания и принципов их выбора. Статья основана на руководствах, составленных специалистами компании Vishay — одного из мировых лидеров в производстве данного вида компонентов. Материал призван помочь разработчику правильно интерпретировать сведения, приводимые в технической документации, и реально оценивать преимущества и ограничения алюминиевых конденсаторов. Использование этой информации, а также инструментария для вычислений поможет принимать действительно обоснованные решения при выборе элементной базы для источников питания.**

Хотя алюминиевые конденсаторы часто рассматривают как изделия широкого применения, они, после индуктивных элементов, часто бывают самыми дорогими пассивными компонентами в источниках питания, поэтому необходимо уделять особое внимание их выбору. Однако выбор конденсатора не является столь простым, как это может показаться с первого взгляда: имеется много различных типов конденсаторов, а большое количество информации, содержащейся в технической документации, не всегда допускает однозначную интерпретацию. Программы для моделирования схем еще более усложняют ситуацию, поскольку они не могут точно учесть зависимость характеристик компонентов от частоты, температуры и времени. Для точного моделирования разработчик должен вводить наиболее подходящие значения параметров для заданных рабочих режимов. Это, в свою очередь, требует ясного понимания зависимости параметров компонентов от различных факторов. Кроме того, необходимо представлять, как это поведение изменяется со временем, чтобы гарантировать надежную работу изделия в течение всего срока его службы.

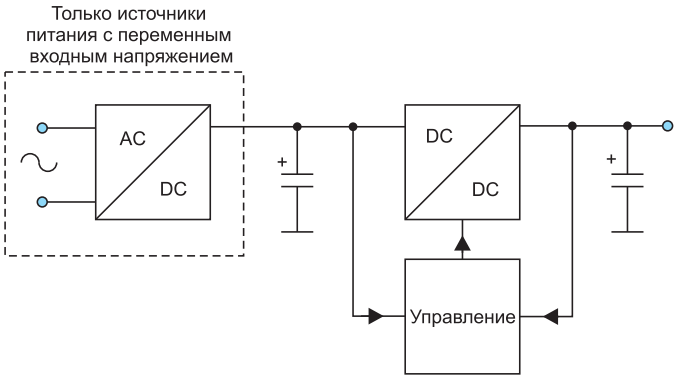


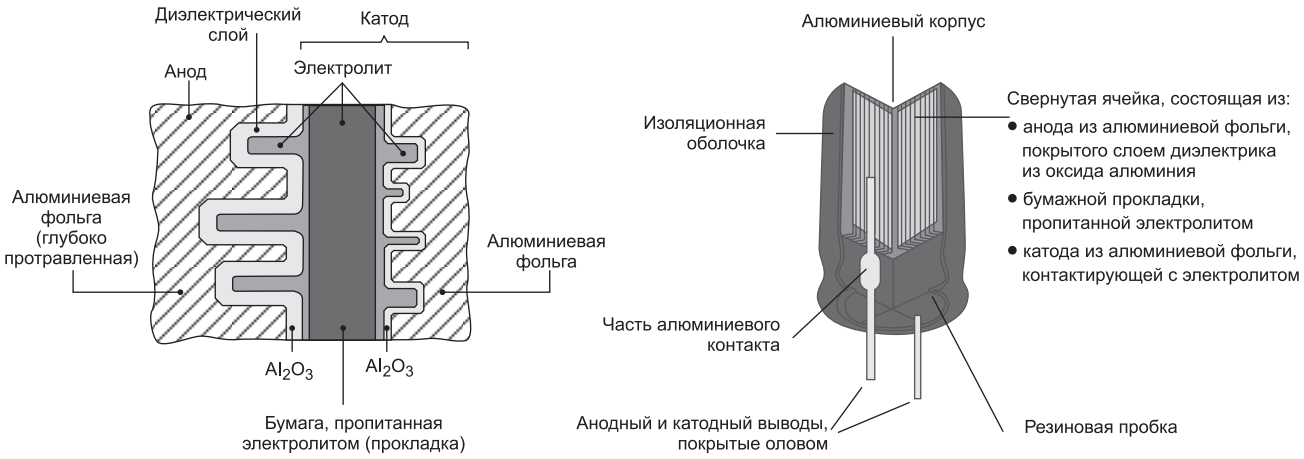

**Рис. 1. Базовая топология источника питания**

## Введение

На рис. 1 изображена базовая топология источника питания, а в таблице 1 перечислены функции алюминиевых электролитических конденсаторов,

**Таблица 1. Функции алюминиевых конденсаторов и их влияние на работу схемы**

| Расположение на схеме | Функция алюминиевых конденсаторов | Потенциальные источники проблем |
|---|---|---|
| Входной буфер | • Обеспечивают запас энергии, когда входное напряжение слишком низкое<br>• Запасают энергию в моменты, когда AC/DC-преобразователь, например PFC-контроллер, перестраивается на новый уровень выходной мощности<br>• Препятствуют проникновению в питающую сеть ВЧ-шума переключения от DC/DC-преобразователя | • Уменьшение емкости приводит к падению напряжения на конденсаторе ниже минимально допустимого входного напряжения DC/DC-преобразователя<br>• Увеличение ESR приводит к увеличению уровня напряжения ВЧ-шума на алюминиевом конденсаторе и уменьшению его фильтрующих свойств |
| Выходной буфер | • Накопление тока для дросселя (преобразование ток-напряжение), фильтрация<br>• Буферизация энергии, пока DC/DC-преобразователь адаптируется к изменению выходной мощности | • Увеличение ESR приводит к возрастанию пульсаций напряжения на выходе и может оказывать влияние на стабильность управляющей петли обратной связи<br>• Уменьшение емкости приводит к большим выбросам напряжения |




● **Рис. 2. Базовая конструкция нетвердотельных алюминиевых конденсаторов**

в зависимости от их расположения на схеме. В общем случае, алюминиевые конденсаторы являются наиболее предпочтительными для таких задач, как низкочастотная фильтрация и накопление энергии, где необходимы большие значения емкости и номинальной мощности. Алюминиевые конденсаторы обладают высоким соотношением CU/цена, имеют небольшой размер по сравнению с другими типами конденсаторов и относительно нечувствительны к перегрузкам по напряжению и току. Кроме того, их выпускают с большим диапазоном емкости, рабочего напряжения и габаритных размеров.

## Внутреннее устройство

На рис. 2 показано внутреннее устройство современных нетвердотельных алюминиевых конденсаторов, которые имеют обкладки, свернутые в цилиндр, и состоят из:

- электрохимически протравленной алюминиевой фольги, образующей первую, анодную, обкладку конденсатора;
- оксидного слоя на протравленной поверхности алюминиевой фольги, который формирует диэлектрик;
- бумажной разделительной прокладки, пропитанной жидким электролитом, которая контактирует с оксидным слоем и образует вторую обкладку конденсатора;
- второго слоя фольги, формирующего второй контакт с жидким электролитом.

В нетвердотельных алюминиевых конденсаторах жидкий электролит, образующий вторую обкладку конденсатора, проникает через поры анодного оксидного слоя, чтобы обеспечить максимальную площадь контакта и, таким образом, достичь высокого значения емкости.

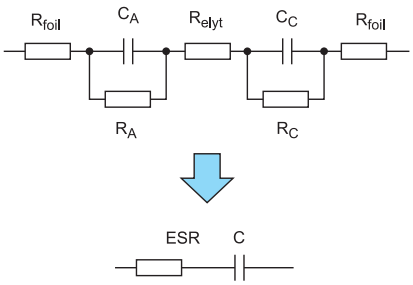
В случае твердотельных алюминиевых и танталовых SMD-конденсаторов вторая обкладка сформирована пропитывающим поры анода оксидным слоем с электролитом, который специальным образом обрабатывают, чтобы преобразовать его в твердое состояние.

## Электрические характеристики

Перенос заряда к анодному оксидному слою и от него в нетвердотельных алюминиевых конденсаторах осуществляется через электролит и из-за его свойств вызывает температурную зависимость проводимости. Это, в свою очередь, приводит к омическим потерям. Кроме того, алюминиевый оксид сам делает вклад в увеличение омических потерь, которые очень сильно возрастают с увеличением частоты. На очень высоких частотах скин-эффект приводит к тому, что ток течет только по поверхности алюминиевых обкладок, увеличивая омические потери.

Весь вклад различных факторов в омические потери конденсаторов можно объединить термином эквивалентное последовательное сопротивление (ESR). Это отображено на эквивалентной схеме алюминиевого конденсатора для переменного тока (рис. 3). В данной модели $R_A$ и $R_C$ отражают частотную зависимость потерь, связанных с анодной фольгой ($R_A$) и находящимся в контакте с фольгой электролитом ($R_C$). Сопротивление потерь не следует путать с эквивалентным параллельным сопротивлением, которое используется в модели для постоянного тока, чтобы охарактеризовать ток утечки конденсатора.

Примеры на рис. 4а и 5а иллюстрируют, что ESR не является простой, однокомпонентной величиной, но очень сильно зависит от частоты и температуры. На рис. 4б и 5б показано, что то же самое справедливо и для емкости. Изменение емкости происходит из-за того, что сопротивление электролита в мелких порах оксида, покрывающего анодный электрод, объединяясь с емкостью пор, образует низкочастотный фильтр. На высоких частотах большая часть емкости пор оказывается изолированной и остается только поверхностная емкость обкладок. При низкой температуре пониженная проводимость электролита уменьшает значение частоты, на которой начинает проявляться этот




● **Рис. 3. Эквивалентная схема для переменного тока**

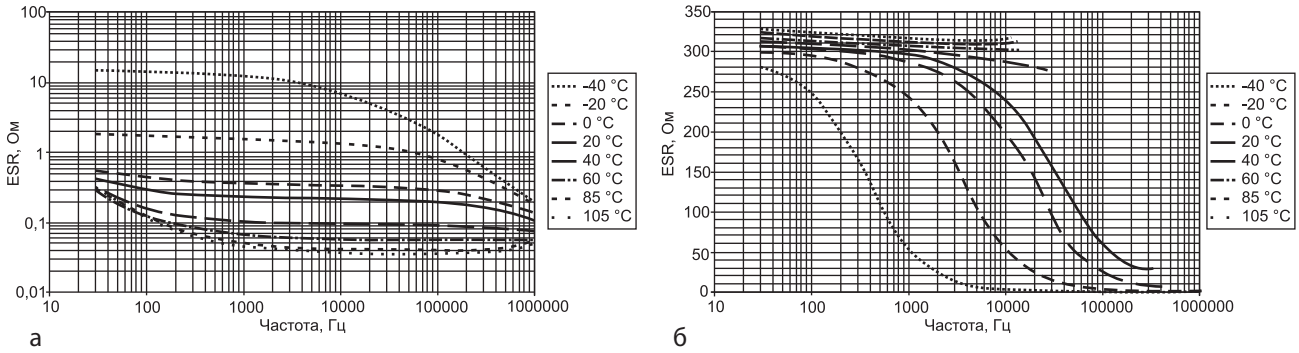



**Рис. 4. Пример зависимости для высоковольтного конденсатора (159 PUL-SI, 330 мкФ/400 В в начале срока службы): а) ESR, б) емкости**

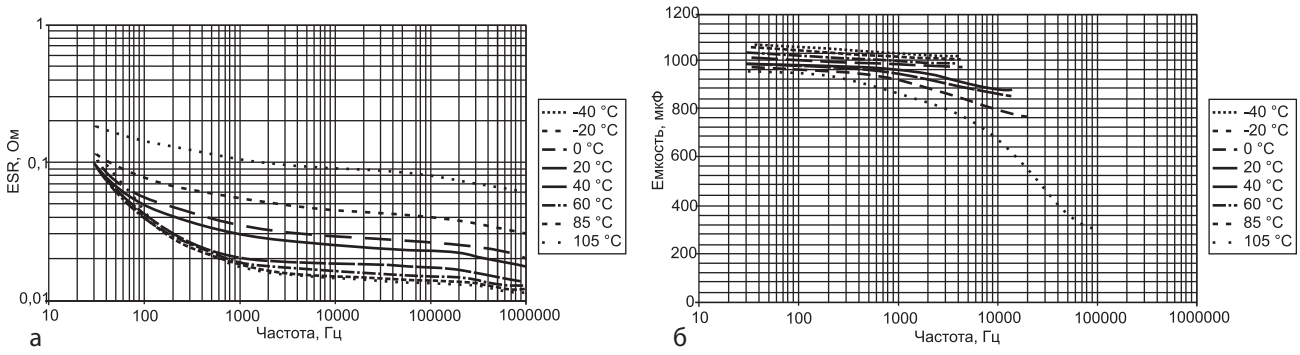



**Рис. 5. Пример зависимости для низковольтного конденсатора (136 RVI, 1000 мкФ/50 В в начале срока службы): а) ESR, б) емкости**

эффект. Заметим, что на рис. 4б и 5б данные высокочастотных измерений не показаны, поскольку они оказываются искаженными эффектами от паразитной индуктивности компонентов.

Присутствие жидкого электролита приводит также к изменению электрических характеристик со временем. Даже при комнатной температуре электролит внутри конденсатора будет испаряться. Поскольку испарившийся электролит не имеет возможности выходить из герметичного корпуса конденсатора непосредственно в воздух, он будет приникать через герметик. В результате конденсатор будет медленно терять электролит, пока тот совсем не иссякнет. При более низкой температуре процесс утечки электролита будет происходить медленнее, что увеличит срок службы конденсатора.

Температуру корпуса конденсатора определяют как температура окружающей среды, так и нагрев компонента, вызванный омическими потерями при прохождении тока. Оба эти фактора влияют на скорость потери электролита. При уменьшении количества электролита в конденсаторе увеличиваются омические потери или ESR, поскольку уменьшается возможность переноса заряда к и от анодного оксидного слоя. Одновременно уменьшается емкость конденсатора, поскольку часть электролита не может больше контактировать с полной поверхностью пор, протравленных на аноде.

Изменения электрических характеристик конденсатора, в конечном счете, приводят к нарушению нормальной работы схемы, и срок службы конденсатора заканчивается.

Алюминиевые конденсаторы наиболее часто используются в схемах источников питания в качестве буфера для накопления электрической энергии или фильтров верхних или нижних частот. В обоих случаях для правильного выбора компонента достаточно вычислить необходимую (минимальную) емкость. Однако специфическая конструкция и свойства алюминиевых конденсаторов требуют учета и других факторов, чтобы обеспечить продолжительное время безотказной работы.

Рассмотрим принципы выбора алюминиевых конденсаторов в зависимости от конкретных требований проектируемого приложения.

## Минимальная емкость

При выборе емкости алюминиевого конденсатора для конкретной схемы обычно пользуются следующими соотношениями:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C} \quad (1)$$

(развязка по постоянному току, фильтрация).

$$P \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left( U_t^2 - U_{t+\Delta t}^2 \right) \quad (2)$$

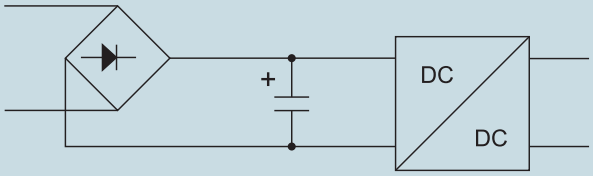
(буферизация, аккумулирование энергии).

Уравнение 1, применимое для простейшей конфигурации RC-фильтра, требует небольшого пояснения. Для низких температур и высоких частот влияние ESR, которое не отражено в этом уравнении, не всегда может оказаться пренебрежимо малым. Во многих случаях значение R не всегда очевидно из принципиальной схемы, например если это — последовательное сопротивление диода выпрямительного моста.

Уравнение 2 описывает соотношение между энергией, запасаемой

в электролитическом конденсаторе ($E = 1/2\ CU^2$), и мощностью, которую может отдавать алюминиевый конденсатор за промежуток времени $\Delta t$. Эту формулу можно использовать для вычисления минимальной емкости конденсатора для входного буфера источника питания (см. пример 1). Заметим, что требования к минимальной емкости должны выполняться и в конце срока службы, который для некоторых электролитических конденсаторов наступает, когда их емкость снижается на 30%.

**Пример 1. Вычисление минимально необходимой емкости**




**Источник питания:**
Мощность 100 Вт, КПД 85%, время задержки 20 мс, входное напряжение 220 В ± 10%. Для нормальной работы обратноходового преобразователя необходимо минимальное входное напряжение 80 В.

$$P=\frac{100}{0,85}=118\ Bm;\ \Delta t = 20\ мкс$$

$$U(t)=220\cdot(1-0,1)\cdot\sqrt{2}=280\ В;\quad U(t+\Delta t)=80\ В$$

$$C_{min}=\frac{2\cdot P\cdot\Delta t}{U_t^2-U_{t+\Delta t}^2}=\frac{2\cdot 118\cdot 20\cdot 10^{-3}}{280^2-80^2}=66\ мкФ$$

Это — минимальное значение емкости, которое отвечает требованиям схемы. Такое значение минимальной емкости необходимо обеспечить в конце срока службы устройства. Если предположить, что емкость конденсатора уменьшится на 15%, то для обеспечения нормальной работы устройства в течение всего срока службы необходимо выбрать начальную емкость конденсатора не менее 78 мкФ.

$$C_{end}=\frac{1}{1-0,15}\cdot C_{min}=\frac{1}{0,85}\cdot 66\ мкФ=78\ мкФ\Rightarrow$$

используем конденсатор емкостью 100 мкФ ± 20%
(100 мкФ – 20% = 80 мкФ > 78 мкФ)

## Срок службы

Окончание срока службы электролитического конденсатора определяется не только временем его фактического использования, но и в еще большей степени рабочей температурой. Поставщики алюминиевых конденсаторов создали ряд показателей качества, связанных со сроком эксплуатации. Для проверки того, что алюминиевые конденсаторы реально дорабатывают до конца срока службы, указанного в документации, изготовители должны регулярно тестировать свои изделия. Однако предпочтительно тестирование конденсаторов при высокой температуре, чтобы подтвердить больший срок службы при низких температурах. Но такое тестирование возможно только в том случае, если изделия могут выдержать высокую температуру. Это приводит к широко распространенному заблуждению, что конденсаторы с рабочей температурой 105 °C являются более высококачественными, чем конденсаторы с рабочей температурой 85 °C. Такое мнение основано на предположении, что оба типа конденсаторов имеют одинаковые условия «конца срока службы». На самом деле множество других факторов определяют качество алюминиевого конденсатора. Если в приложении не требуется работа при высокой температуре, то выбор конденсатора с рабочей температурой 85 °C с бóльшим сроком службы может значительно уменьшить стоимость решения.

## Рабочая температура

Когда теплота, выделяемая за счет омических потерь, незначительна — например, для алюминиевых конденсаторов, используемых во времязадающих цепях, — расчет срока службы можно производить, основываясь на эмпирической зависимости, получаемой из уравнения Аррениуса. Оно утверждает, что срок службы эффективно удваивается при уменьшении температуры окружающей среды на каждые 10 °C. Однако при использовании алюминиевых конденсаторов в источниках питания такое упрощение невозможно, поскольку пренебречь увеличением температуры за счет омических потерь при заряде и разряде конденсатора нельзя. Поэтому чтобы учесть эффект роста температуры, необходимо использовать специальные методы. Одним из ключевых является соотношение между

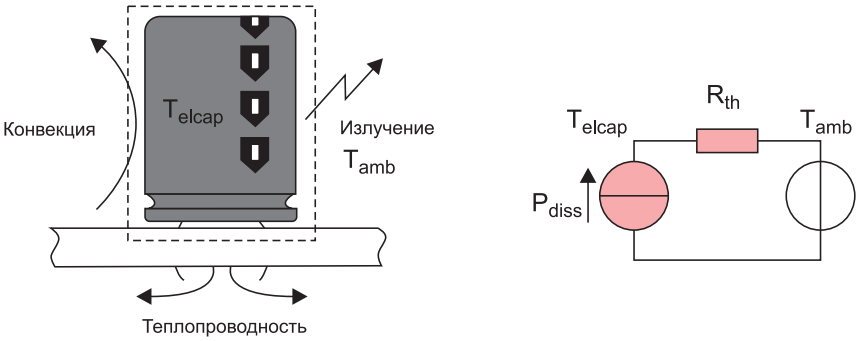



**Рис. 6. Упрощенная температурная модель конденсатора**

нагревом, током заряда/разряда (или пульсирующим током) и возможностью алюминиевого конденсатора рассеивать тепло.

Процесс рассеяния конденсатором в окружающее пространство тепла можно описать с помощью упрощенной температурной модели, изображенной на рис. 6. Все, что расположено внутри пространства, ограниченного штриховой линией, имеет температуру $T_{elcap}$, а все, что расположено за пределами этого пространства, имеет температуру $T_{amb}$. Тепло, созданное внутри пространства, ограниченного штриховой линией, передается в пространство за пределами этой линии с помощью конвекции, излучения и теплопроводности. Для каждого из этих способов теплопередачи требуется наличие разности температур. Электрический аналог тепловой модели показан на рис. 6 справа.

Заметим, что тепловое сопротивление $R_{th}$ (в К/Вт) — это соотношение между разностью температур и количеством переносимого тепла. На значение $R_{th}$ оказывают влияние условия окружающей среды, такие как воздушные потоки (конвекция) или контакт с охлаждающей поверхностью (теплопередача). Если $I_{ripple}$ определяет среднеквадратичное значение пульсирующего тока через алюминиевый конденсатор, то используя эту упрощенную тепловую модель, тепловую мощность, рассеиваемую на конденсаторе, можно определить как:

$$P_{diss} = ESR \cdot I^2_{ripple}, \quad (3)$$

а увеличение температуры алюминиевого конденсатора как:

$$\Delta T_{elcap} = R_{th} \cdot P_{diss} = R_{th} \cdot ESR \cdot I^2_{ripple}. \quad (4)$$

Однако тепловое сопротивление ($R_{th}$) и сопротивление омических потерь (ESR) оба зависят от условий окружающей среды и обычно не оговариваются изготовителями конденсаторов. Обычно они указывают только допустимый пульсирующий ток ($I_R$) для заданной частоты и температуры. Для определения ESR и $R_{th}$ используется тепловая модель или прямые измерения. Более прямым подходом является отказ от вычислений и сравнение рассеяния тепла в условиях приложения с рассеянием тепла в эталонных условиях (обычно при обдуве со скоростью <0,5 м/с). При этих эталонных условиях в документации обычно задается номинальный пульсирующий ток $I_R$, который приводит к заданному увеличению температуры:

$$\Delta T_R = R_{th} \cdot ESR \cdot I^2_{ripple}. \quad (5)$$

Номинальный пульсирующий ток является показателем качества и указывает на то, как хорошо алюминиевый конденсатор может пропускать через себя ток пульсаций. Ток $I_R$ зависит от ESR при выбранной частоте и температуре и определяет рост температуры и возможности алюминиевого конденсатора по рассеянию тепла. Например, алюминиевые конденсаторы Vishay проектируются таким образом, чтобы выдерживать нагревание, вызванное прохождением номинального пульсирующего тока при максимальной рабочей температуре в течение всего срока службы. Обычно пульсирующий ток задается при частоте 100 Гц, 120 Гц или 100 кГц и определяется как вызывающий рост внутренней температуры конденсатора на 5…10 °C.

Для приложений, в которых частота основной гармоники пульсирующего тока совпадает с частотой, при которой указан номинальный пульсирующий ток, $I_A$ равен $I_{ripple}$, и рост температуры ($\Delta T_{elcap}$) для таких приложений задается уравнением 6.

$$\Delta T_{elcap} = \Delta T_R \cdot \frac{I^2_A}{I^2_R}. \quad (6)$$

Из этого уравнения можно видеть соотношение между ростом температуры и параметром $I_A/I_R$ и, таким образом, связь между $I_A/I_R$ и омическими потерями.

Расчет роста температуры становится более сложным, когда частота пульсирующего тока в приложении отличается от частоты, при которой задан номинальный пульсирующий ток. Поскольку рассеиваемая мощность зависит от ESR, необходимо вводить корректирующий коэффициент, учитывающий зависимость ESR от частоты. Вычисления можно упростить, сделав следующие предположения:

1. Пульсирующие токи от разных источников не связаны по фазе.
2. Пульсирующие токи приблизительно синусоидальные (то есть эффектом от высших гармоник можно пренебречь).

В обобщенной форме, если в пульсирующий ток имеется вклад $I_{f1}$, $I_{f2}$... от различных источников с частотами f1, f2... (например, 100 Гц от выпрямления напряжения питающей сети, 30 кГц от импульсного преобразователя), общий нагрев алюминиевого конденсатора можно рассчитать по формулам:

$$\Delta T_{elcap} = \Delta T_{IR} \cdot \frac{P_{diss}}{P_{IR}} \quad (7)$$

$$= \Delta T_{IR} \cdot (1 / I_R^2) ((I_{f1} / K_{f1})^2 + ... + (I_{fn} / K_{fn})^2)$$
$$= \Delta T_{IR} (I^2_A / I^2_R),$$
$$\text{где } K_{fn} = (ESR_{100Гц} / ESR_{fn})^{1/2}. \quad (8)$$

Значение $I_R$ взято при частоте 100 Гц. Снова легко видеть связь между параметром $I_A/I_R$ и ростом температуры, вызванным омическими потерями. Единственным отличием является использование при вычислении эквивалентного пульсирующего тока $I_R$ и заключается оно в использовании коэффициента коррекции пульсирующего тока ($K_{fn}$) для компенсации различия между ESR на частоте компонентов пульсирующего тока в приложении и ESR на частоте, при которой был задан $I_R$. Для каждой серии алюминиевых конденсаторов Vishay в документации приводится таблица с коэффициентами коррекции, которые затем можно использовать для вычисления соотношения $I_A/I_R$.

Расчет роста температуры при использовании принудительного охлаждения может оказаться еще более сложным. В большинстве случаев принудительное охлаждение не используется, поэтому дополнительный коэффициент при расчете роста температуры конденсатора относительно эталонных условий обычно не учитывают.

***Продолжение статьи читайте в следующем номере «Вестника электроники».***